Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 22, No. 1, Spring 2024, p. 31-44

Modeling Maize Production under Different Management Scenarios in Kerman Province

N. Zakeri[1], H. Farahbakhsh[2*], M. Madadizadeh[3]

1- Former MSc Student of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran
2- Professor in Genetic and Plant Production Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran
3- Department of Agroecology, Environmental Science Research Institute, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: hfarahbakhsh@uk.ac.ir)

Received: 21 May 2023 Revised: 13 September 2023 Accepted: 25 September 2023 Available Online: 25 September 2023	**How to cite this article:** Zakeri, N., Farahbakhsh, H., & Madadizadeh, M. (2024). Modeling Maize Production under Different Management Scenarios in Kerman Province. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *22*(1), 31-44. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.82507.1248

Introduction

Agriculture is a cornerstone of many developing economies, providing food, income, and employment for millions of people. It is also projected to play a vital role in feeding a global population of 9.1 billion people by 2050. However, there are growing concerns about the environmental impact of agriculture, particularly in arid and semi-arid regions like Iran. Managing water and fertilizer usage in agriculture is crucial to ensuring food security and sustainability. However, conducting field experiments to assess the interaction of all factors involved is expensive and time-consuming. This research focuses on optimizing maize production in Kerman province, a region where maize is a major crop. The research is motivated by the need to improve resource management in Iran, where water and fertilizer resources are limited. The APSIM model is used to determine the best management scenario for maize production in Kerman province. APSIM is a crop growth simulation model that can be used to predict the impact of different management practices on crop yield, water use efficiency, and nutrient use efficiency. The use of APSIM in this research provides a cost-effective and time-efficient alternative to conducting extensive field experiments. The results of this research will contribute to the development of sustainable and efficient agricultural practices in Kerman province and similar regions. These regions are characterized by resource constraints, such as limited water and fertilizer availability. The research aimed to simulate the effect of management parameters (planting date and irrigation) on Crop yield and subsequently achieve the optimal management scenario.

Materials and Methods

The APSIM model was used for simulation in three regions of Bardsir (temperate to cold climate), Jiroft (hot and humid climate), and Orzuye (hot and dry climate). The model requires four series of data: climate, soil, management, and crop data. The required climate data (from 1998 to 2018) including daily maximum and minimum temperatures, length of sunny hours, and daily precipitation were collected and prepared from the synoptic weather stations of the three mentioned regions.

The management data set for each of the study regions was prepared in the form of questionnaires and field research from experts of the Agricultural Jihad Organization, the Agricultural Research Center Organization, and prominent farmers in those regions. The crop data includes the plant genetic coefficients of the maize single

https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.82507.1248

cross hybrid 704, which were obtained from the calibration of the APSIM model. To optimize planting date and irrigation management in the studied areas, different planting and irrigation date treatments were investigated. In this research, planting date treatments included the conventional planting date of the region, 20 days before the conventional planting date (as early planting date), and 20 days after the conventional planting date (as late planting date). Irrigation treatments included the usual number of irrigations in the region (13 irrigations), less irrigation (11 irrigations), and more irrigation (15 irrigations).

Results and Discussion

Our results showed that the model successfully simulated maize phenology, especially maturity date, with high accuracy for all fertilizer amounts tested. The model performance in predicting biomass under different nitrogen treatments was also satisfactory, with a minimal difference between observed data and model results. The nRMSE of grain yield in the calibration stage was 11.2% and in the validation stage was 9%. The nRMSE for calibration of the biological yield of SC 704 was 14.8% and for validation was 13.9%. Also, the model was able to simulate phenology with very high accuracy (especially the days to maturity). Overall, the nRMSE of days to flowering was less than 10% and for the days to maturity was less than 5%. Late planting dates consistently showed better performance across regions and irrigation treatments, resulting in significantly increased grain yield compared to conventional and early planting dates. The highest seed yield was obtained with 15 times of irrigation, among the various irrigation treatments. Late planting combined with 15 times of irrigation yielded the best results in Kerman province, particularly in Bardsir, with a yield of 9300 kg ha^{-1}. Optimal moisture and air conditions, along with the cultivation of a late-maturing variety, contributed to the higher seed yield. These findings are consistent with previous research that has confirmed the positive impact of late planting and extended ripening periods on maize yield.

Conclusion

Our results showed that the model simulates the growth and yield of single cross 704 corn in Kerman province well, even after 20 days of late planting. Long-term simulation experiments showed that maize grain yield varied depending on the region, with the highest yield in Bardsir (8317 kg ha^{-1}) and the lowest yield in Jiroft (4735 kg ha^{-1}). The optimum maize grain yield (8872.8 kg ha^{-1}) was obtained by the interaction effect of late planting date and 15 times of irrigation.

Keywords: APSIM model, Grain yield, Irrigation, Simulation, Sowing date

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۲۲، شماره ۱، بهار ۱٤۰۳، ص ٤٤-۳۱

مدل‌سازی تولید ذرت دانه‌ای در سناریوهای مختلف مدیریتی در استان کرمان

نادر ذاکری[۱]، حسن فرح بخش[۲*]، محمد مددی زاده[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۳

چکیده

امروزه بهره‌گیری از رهیافت مدل‌سازی به‌عنوان ابزاری مفید برای بهینه‌سازی تولید محصولات کشاورزی در نظر گرفته می‌شود. هدف این مطالعه استفاده از مدل زراعی APSIM جهت ارزیابی تولید ذرت در ۳ منطقه (بردسیر، جیرفت و ارزوئیه) در استان کرمان با استفاده از آزمایش‌های شبیه‌سازی بلندمدت (۱۳۹۷-۱۳۷۹) در ۳ تاریخ کاشت (زودهنگام، مرسوم و دیرهنگام) و ۳ تیمار آبیاری (۱۱، ۱۳ و ۱۵ نوبت) بود. قبل از استفاده، مدل با استفاده از اطلاعات آزمایشات مزرعه‌ای اجراشده در منطقه موردمطالعه مورد واسنجی و ارزیابی قرار گرفت. واسنجی و ارزیابی مدل APSIM در پیش‌بینی عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و صفات فنولوژیکی هیبرید ذرت سینگل‌کراس ۷۰۴ تحت تأثیر مقادیر مختلف نیتروژن (۰، ۹۲ و ۳۶۸ کیلوگرم در هکتار) انجام شد. نتایج نشان داد که مدل APSIM قابلیت خوبی در شبیه‌سازی عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و مراحل فنولوژیکی گیاه در دو مرحله واسنجی (مقدار nRMSE به‌ترتیب ۱۴/۸، ۱۱/۲۳ و کمتر از ده درصد) و مرحله اعتبارسنجی (مقدار nRMSE به‌ترتیب ۱۳/۹، ۹ و کمتر از پنج درصد) داشت. عملکرد دانه در مناطق مختلف متفاوت بود به طوری که در سراسر تیمارهای تاریخ کاشت و آبیاری، بیشترین عملکرد دانه ذرت در شهرستان بردسیر با ۸۳۱۷ کیلوگرم در هکتار و کمترین مقدار آن در شهرستان جیرفت با ۴۷۳۵ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد. در بین تاریخ کاشت‌های مختلف تاریخ کاشت‌های دیرهنگام عملکرد دانه بیشتری (۸۵۲۹ کیلوگرم در هکتار) تولید کردند. همچنین در تیمارهای مختلف آبیاری، بیشترین عملکرد دانه به‌ترتیب با ۶۳۱۷، ۵۹۱۹ و ۵۶۷۱ کیلوگرم در هکتار در تیمارهای ۱۵، ۱۳ و ۱۱ نوبت آبیاری به‌دست آمد. در تمام مناطق مورد مطالعه عملکرد بهینه دانه ذرت (۸۸۷۲/۸کیلوگرم در هکتار) در اثر متقابل تاریخ کاشت دیر هنگام در ۱۵ نوبت آبیاری به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، تاریخ کاشت، شبیه‌سازی، عملکرد دانه، مدل APSIM

مقدمه

کشاورزی مهم‌ترین بخش اقتصادی در بسیاری از کشورهای در حال‌توسعه به‌شمار رفته و انتظار می‌رود غذای جمعیت پیش‌بینی‌شده نه و یک دهم میلیارد نفری جهان تا سال ۲۰۵۰ را تامین نماید (Amjed *et al*., 2012). ذرت با نام علمی (*Zea mays* L.) گیاهی از خانواده گرامینه و از غلات مهم مناطق گرمسیری و معتدل جهان می‌باشد (FAO, 2017). سطح زیر کشت ذرت دانه‌ای در ایران حدود ۱۵۹۱۰۶ هکتار با میانگین عملکرد ۷۱۳۹ کیلوگرم دانه در هکتار می‌باشد. استان کرمان با ۳۵۸۴۶ هکتار سطح زیر کشت ذرت دانه‌ای (۲۳۸۶۵ هکتار مربوط به جنوب استان کرمان و ۱۱۹۸۱ هکتار مربوط به استان کرمان) و میانگین عملکرد ۷۲۸۳ کیلوگرم دانه در هکتار، رتبه سوم تولید این محصول را پس از استان خوزستان و فارس در کشور دارا می‌باشد (Anonymous, 2022). آبیاری را می‌توان بر اساس نوع گیاه، خاک و آب و هوا به‌صورت آبیاری کامل و کم‌آبیاری طبقه‌بندی کرد. آبیاری کامل می‌تواند به عملکرد بالا و پایداری عملکرد ذرت کمک کند (Teixeira *et al*., 2017). نیاز آبی گیاه ذرت در مراحل مختلف رشد متفاوت است. برای جلوگیری از تنش آبی در مراحل بحرانی رشد، آبیاری تکمیلی و همچنین تاریخ کاشت

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد زراعت، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران
۲- استاد گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران
۳- دانش‌آموخته دکتری اگرواکولوژی، گروه کشاورزی اکولوژیک، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: hfarahbakhsh@uk.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.82507.1248

زودهنگام جهت افزایش عملکرد و کارایی مصرف آب توصیه می‌شود (Marwein *et al*., 2017). همچنین در بررسی آبیاری و تاریخ کاشت بهینه بر روی عملکرد ذرت در شمال شرقی چین، نتایج نشان داد آبیاری در اواخر ماه ژوئن تا اوایل جولای منجر به افزایش عملکرد دانه به میزان ۳۵ درصد در مقایسه با تیمار آبیاری دیم و تاریخ کاشت دیرهنگام شد (Zizhong & Zenghui, 2016).

برای بررسی سناریوی‌های مدیریتی مختلف در کشاورزی رهیافت‌های مختلفی وجود دارد. آزمایش‌های مزرعه‌ای برای بررسی اثر متقابل تمامی عوامل روی رشد گیاه مفید می‌باشند ولی انجام این آزمایش‌ها زمان‌بر و پر هزینه است. از دیگر محدودیت‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای می‌توان به محدود بودن اعتبار آزمایش‌ها به شرایط فیزیکی، کوتاه بودن مدت زمان آزمایش و نیز محدودیت تعداد تیمار و سناریوهای مورد بررسی اشاره کرد. مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی می‌توانند کاربردهای بسیار جذاب و موثری در این زمینه داشته و نقش مهمی در مواردی که محدودیت منابع، تأثیرات منفی بر پژوهش‌های کشاورزی می‌گذارند، ایفا نمایند (Amjed *et al*., 2012). در واقع می‌توان گفت این مدل‌ها تنها راه تلفیق یافته‌های تحقیقاتی حاصل از مطالعات صورت گرفته در بخش‌های مجزا از یکدیگر می‌باشند (Soltani & Sinclair, 2012).

شبیه‌ساز سیستم‌های تولید کشاورزی (APSIM[1]) یک مدل شبیه‌سازی فرآیندگرای گیاه زراعی و سیستم‌های زراعی است (McCown, Hammer, Hargreaves, Holzworth, & Freebairn, 1996). این مدل قادر است محصول اقتصادی طیف وسیعی از گیاهان زراعی، مرتعی و درختان را در پاسخ به عوامل اقلیمی، خاکی و مدیریتی شبیه‌سازی نماید. این مدل همچنین این توانایی را دارد تا انواع سیستم‌های تناوبی را نیز شبیه‌سازی کند (Wang *et al*., 2002). مدل APSIM توسط محققین استرالیایی طراحی شده است و از قدرت بالایی برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان زراعی برخوردار است. ماژول ذرت در این مدل، رشد و نمو ذرت را به‌صورت روزانه شبیه‌سازی می‌کند و به عوامل مختلف ازجمله آب‌وهوا (دما، بارندگی، تابش)، خاک (آب خاک و نیتروژن خاک)، پارامترهای ژنتیکی و اطلاعات مدیریتی محصول زراعی پاسخ نشان می‌دهد (Fosu-Mensah, MacCarthy, Vlek, & Safo, 2012).

محققان در بررسی تأثیر نحوه مدیریت بقایای گیاهی بر عملکرد دانه سورگوم با استفاده از مدل APSIM دریافتند که طی یک دوره ۳۰ ساله با کاهش میزان مواد آلی خاک به‌تدریج از عملکرد دانه سورگوم کاسته خواهد شد (MacCarthy, Sommer, Vlek, 2009). در این آزمایش مدل APSIM توانست به‌خوبی تأثیر کودهای آلی و شیمیایی بر گیاه را شبیه‌سازی نماید. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که در صورت برگرداندن کامل بقایای گیاهی به خاک، می‌توان از مصرف ۵۰ درصد میزان معمول کود شیمیایی نیتروژن در مزارع صرفه‌جویی نمود. در تحقیقی دیگر ضمن استفاده از مدل APSIM برای پیش‌بینی پاسخ عملکرد بیولوژیک سورگوم نسبت به کود نیتروژن و فسفر تحت دو نظام متفاوت مدیریتی در غنا، قدرت پیش‌بینی عملکرد بیولوژیک (R^2=۰/۸۶) توسط مدل را خوب ارزیابی کردند (Kpongor, 2007). محققان به کمک مدل APSIM رشد و عملکرد دو گیاه ذرت و لوبیا نسبت به منابع مختلف تأمین فسفر (کود شیمیایی و مرغی) در خاک‌های مختلف را در کنیا شبیه‌سازی نمودند (Delve *et al*., 2009). مقدار متوسط R^2 بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده عملکرد دانه و مجموع بیوماس تولیدی برای لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) به‌ترتیب برابر با ۰/۷۹ و ۰/۶۹ و برای ذرت ۰/۸۲ و ۰/۷۴ بود. آن‌ها بیان داشتند که مدل APSIM در پیش‌بینی رشد و عملکرد گیاهان ذرت و لوبیا تحت تأثیر منابع مختلف تامین فسفر و مقادیر مختلف آن از اعتبار کافی برخوردار است.

با توجه به نگرانی‌های مربوط به محیط‌زیست، حفاظت خاک و مسئله‌ساز بودن روزافزون کمبود آب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، لازم است مدیریت استفاده از آب و کود به گونه‌ای باشد تا با حداقل خسارت وارده، حداکثر درامد حاصل شود (Keating *et al*., 2003). لذا این تحقیق با هدف ارزیابی مدل APSIM برای شبیه‌سازی رشد و نمو ذرت دانه‌ای در استان کرمان و همچنین استفاده از این مدل جهت تعیین بهترین سناریوی مدیریتی از نظر تعداد دفعات آبیاری و تاریخ کاشت برای تولید ذرت انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سه منطقه بردسیر (اقلیم معتدل تا سردسیری)، جیرفت (اقلیم گرم و مرطوب) و ارزوئیه (اقلیم گرم و خشک)، با هدف شبیه‌سازی تأثیر پارامترهای مدیریتی (تاریخ کاشت و آبیاری) بر عملکرد گیاه و متعاقبا دستیابی به سناریوی بهینه‌ی مدیریتی با استفاده از رهیافت شبیه‌سازی صورت گرفت. خصوصیات اقلیمی و خاک مناطق مورد مطالعه در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده‌اند.

در این تحقیق جهت شبیه‌سازی عملکرد ذرت دانه‌ای از مدل APSIM استفاده شد. این ماژول، دارای ۱۱ مرحله رشد و ۱۰ فاز (زمان به بین مراحل) است. شروع هر فاز با زمان دمایی تجمعی تعیین می‌شود، به‌جز طول دوره کاشت تا جوانه‌زنی، که به رطوبت خاک وابسته است. مدت فاز بین سبز شدن و شروع گلدهی از زمان دمایی ثابت برای رقم تشکیل شده است که معمولاً به نام فاز پایه رویشی یا نوجوانی معروف است. سرعت توسعه بین پایان فاز نوجوانی و گل‌انگیزی در صورتی که رقم حساس به فتوپریود باشد، به طول روز حساس است (Fosu-Mensah *et al*., 2012).

1- The Agricultural Production Systems Simulator

جدول ۱- ویژگی‌های اقلیمی و توپوگرافی مناطق مورد مطالعه
Table 1- Climatic and topographic characteristics of the studied locations

منطقه Location	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	ارتفاع از سطح دریا Elevation (m)	میانگین دمای سالانه Average annual temperature (°C)	بارندگی تجمعی سالانه Annual cumulative rainfall (mm)
بردسیر Bardsir	56.57	29.93	2044	14.5	165
ارزوئیه Orzueeyeh	56.36	28.45	1053	23.3	122.3
جیرفت Jiroft	57.73	28.67	720	25.1	176.2

جدول ۲- خصوصیات خاک مناطق موردمطالعه
Table 2- Soil characteristics of the study areas

خصوصیات Characteristics	مناطق (Regions) بردسیر (Bardsir)	ارزوئیه (Orzuye)	جیرفت (Jiroft)
	Loam sand لوم شنی	Loam لوم	Loam sand لوم شنی
Soil type نوع خاک	126	113	115
Available soil water (mm) آب قابل‌دسترس خاک	1.4	1.62	1.52
Bulk density (g cm^{-3}) وزن مخصوص ظاهری	7.9	7.9	8
pH اسیدیته	2	1.9	1.2
EC (dS m^{-1}) هدایت الکتریکی	0.2	0.2	0.2
Organic carbon (٪) کربن آلی	8.2	79.4	73.1
Nitrate (mg L^{-1}) نیترات	2.13	2.26	2.76
Ammonium (mg L^{-1}) آمونیوم	4	4	10
P (ppm) فسفر قابل‌جذب	120	180	200

این مدل همچنین از طریق ماژول‌های جداگانه‌ی خاک و روابط آبی و نیتروژن را شبیه‌سازی می‌کند. در زیر مدل آب، تقاضای روزانه گیاه برای آب (تقاضای تعرق) از روش ارائه شده توسط Sinclair (1986) و Monteith (1986) شبیه‌سازی شده است. بر اساس این روش تقاضای گیاه برای آب تابعی از سرعت رشد روزانه، کمبود فشار بخار و ضریب کارایی تعرق است. همچنین شبیه‌سازی نیتروژن در مدل APSIM شامل فرآیندهای جذب، انتقال و تجمع نیتروژن در گیاه، آبشویی نیتروژن، نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون و سایر فرآیندهای مرتبط با نیتروژن در خاک می‌باشد که روزانه در هر لایه خاک شبیه‌سازی می‌شوند. فرآیند جذب نیتروژن توسط گیاه نیز همانند جذب آب، بر اساس رویه عرضه و تقاضا برآورد می‌شود.

برای اجرای مدل به چهار سری داده شامل داده‌های آب و هوایی، خاک، مدیریتی و گیاهی نیاز می‌باشد. داده‌های آب و هوایی مورد نیاز (از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۷) متشکل از درجه حرارت‌های بیشینه و کمینه روزانه، طول ساعات آفتابی و میزان بارندگی به‌صورت روزانه بودند که از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک سه منطقه بردسیر، جیرفت و ارزوئیه جمع‌آوری و آماده‌سازی شدند. از آن‌جایی‌که به‌طور معمول شدت تشعشع روزانه در ایستگاه‌های سینوپتیک در کشور به‌طور منظم جمع‌آوری نمی‌شوند، برای برآورد مقدار این متغیر از طول ساعات آفتابی استفاده به‌عمل آمد. بدین منظور برای محاسبه‌ی تابش از ساعات آفتابی و معادله‌ی خطی آنگستروم (Prescott, 1940) استفاده شد:

$$R_s = \left(a + b\frac{n}{N}\right) R_a \qquad (۱)$$

در این رابطه R_s برابر تابش روزانه (مگاژول در مترمربع)، n برابر با تعداد ساعات آفتابی، N برابر با طول روز و R_a برابر با تابش فرازمینی پارامترهای می‌باشند. همچنین، a و b برابر با ضرایب آنگستروم کالیبرشده محلی هستند که در این تحقیق برای مناطق مختلف استان کرمان از مطالعه معینی و همکاران (Moini, Javad, & Dehghan Manshadi, 2011) به‌دست آمدند.

داده‌های مربوط به خاک از ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی (بخش آب و خاک) و آزمایشگاه‌های خاکشناسی جمع‌آوری شدند. این داده‌ها شامل برخی از صفات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی شامل بافت خاک (درصد رس، سیلت وشن)، وزن مخصوص ظاهری، pH، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، میزان کربن آلی و هدایت الکتریکی (EC) بودند. از این داده‌ها برای تخمین ضرایب

خاکی مدل زراعی شامل ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم و نهایتا تخمین آب قابل‌دسترس خاک (میلی‌متر) استفاده شد. برای این کار و تخمین پارامترهای خاکی ذکرشده از مدل SPAW[1] (Saxton & Willey, 2006) استفاده گردید. خصوصیات مربوط به خاک مناطق موردمطالعه در جدول ۲ قابل‌مشاهده می‌باشد.

داده‌های مدیریتی شامل تاریخ کاشت معمول، تراکم بوته (هفت بوته در متر مربع) در واحد سطح، تعداد آبیاری در هر منطقه، مقدار کود نیتروژن در هر منطقه، فاصله ردیف کاشت (۷۵ سانتی‌متر)، نوع شخم (شخم رایج)، عمق کاشت بذر (پنج سانتی‌متر) بودند. مجموعه داده‌های مدیریتی در هرکدام از مناطق مورد بررسی، به‌صورت پرسشنامه‌ای و تحقیقات میدانی از متخصصین سازمان جهاد کشاورزی، سازمان مرکز تحقیقات کشاورزی و کشاورزان برجسته آن مناطق تهیه شد.

داده‌های گیاهی شامل ضرایب ژنتیکی گیاهی هیبرید ذرت سینگل کراس ۷۰۴ می‌باشند که در مرحله واسنجی به‌دست آمدند. برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل زراعی از اطلاعات مطالعه مددی‌زاده (Madadizadeh, 2017) استفاده شد. این آزمایش مزرعه‌ای طی دو سال زراعی ۱۳۹۳ (واسنجی) و ۱۳۹۴ (اعتبارسنجی) در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان انجام گرفت که در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با آرایش فاکتوریل در سه تکرار انجام شد. فاکتورها شامل سه هیبرید ذرت دانه‌ای (سینگل‌کراس ۷۰۴، ماکسیما و تری‌وی‌کراس ۶۰۴) و چهار مقدار نیتروژن (۰، ۹۲، ۲۲۰ و ۳۶۸ کیلوگرم در هکتار) بودند. بعد از واسنجی مدل ضرایب ژنتیکی رقم سینگل کراس ۷۰۴ به‌دست آمدند که در جدول ۳ قابل مشاهده هستند. همچنین جهت ارزیابی بهتر مدل علاوه بر آزمایش سال ۱۳۹۴ در کرمان، از دو آزمایش دیگر که شرایط اقلیمی مشابهی با منطقه مورد مطالعه داشت، استفاده شد (Choukan, 2013; Rafiee Manesh, Aynehband, & Nabati Ahmadi, 2010).

به‌منظور بهینه‌سازی تاریخ کاشت و مدیریت آبیاری در مناطق مورد مطالعه اقدام به بررسی تیمارهای مختلف تاریخ کاشت و آبیاری شد. در این تحقیق تیمارهای تاریخ کاشت شامل تاریخ کاشت مرسوم منطقه، ۲۰ روز قبل از تاریخ کاشت مرسوم منطقه (به‌عنوان تاریخ کاشت زودهنگام) و ۲۰ روز بعد از تاریخ کاشت مرسوم منطقه (تاریخ کاشت دیرهنگام) بودند. تیمارهای آبیاری شامل تعداد آبیاری مرسوم منطقه (۱۳ نوبت)، آبیاری کمتر (۱۱ نوبت) و آبیاری بیشتر (۱۵ نوبت) بودند. در جدول ۴ تاریخ کاشت، تعداد آبیاری و مقدار کود نیتروژن مرسوم در هر منطقه ذکر شده است. در مجموع با در نظر گرفتن سه تیمار تاریخ کاشت، سه تیمار آبیاری، سه منطقه و ۱۹ سال (۱۳۷۹-۱۳۹۷)، ۵۱۳ آزمایش شبیه‌سازی صورت گرفت.

1 -Soil-Plant-Air-Water

ارزیابی کارآیی مدل APSIM در پیش‌بینی فنولوژی، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه ذرت دانه‌ای سینگل‌کراس ۷۰۴ در آزمایشی که قبلا تحت شرایط متفاوت فراهمی نیتروژن (۰، ۹۲ و ۳۶۸ کیلوگرم در هکتار) انجام شده بود، با استفاده از رابطه‌های آماری (۲) تا (۴) انجام شد:

$$nRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \qquad (۲)$$

$$d-index = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Pi-Oi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|\acute{P}i|-|\acute{O}i|)^2} \qquad (۳)$$

$$CRM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}Pi}{\sum_{i=1}^{n}Oi} \qquad (۴)$$

در این رابطه‌ها Pi، Oi، $\bar{O}$ و n به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی داده شبیه‌سازی‌شده، داده مشاهده‌شده، میانگین داده‌های مشاهده‌شده و تعداد داده‌های مشاهده‌شده هستند. مقدار شاخص جذر میانگین مربعات خطای نرمال ($nRMSE$) در بازه‌های ۰-۱۰، ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ به‌ترتیب نشان دهنده‌ی وضعیت ایده‌آل (عالی)، مناسب (خوب) و متوسط مدل در پیش‌بینی و بیشتر از ۳۰ درصد بیانگر عدم کارا بودن مدل (ضعیف) در شبیه‌سازی می‌باشد. مقدار شاخص توافق ویلموت ($d-index$) بین ۰-۱ متغیر است که میزان انطباق میان داده‌های مشاهده‌شده و مقادیر شبیه‌سازی‌شده را نشان می‌دهد. نزدیک بودن مقدار این شاخص به ۱ بیانگر نزدیکی مقادیر شبیه‌سازی‌شده به مقادیر واقعی و در حقیقت کارکرد بهتر مدل است. مقادیر منفی ضریب باقیمانده (CRM) نشان‌دهنده‌ی تمایل مدل (در حالت کلی) برای بیش‌برآورد[2] و مقادیر مثبت آن حاکی از تمایل مدل برای کم‌برآورد[3] در مقایسه با مقادیر مشاهده‌شده می‌باشد.

نتایج و بحث

کارایی مدل APSIM

پیش‌بینی تاریخ گلدهی و رسیدگی توسط مدل APSIM در سال اول (۱۳۹۳) به مراتب دقیق‌تر از سال دوم (۱۳۹۴) آزمایش صورت گرفت. به‌طور کلی نکته‌ی بسیار مهم و قابل‌توجه در این رابطه، عدم حساسیت مدل APSIM در پیش‌بینی فنولوژی گیاه نسبت به مقادیر مختلف کود نیتروژن بود (جدول ۵). در واقع تغییر در مقدار کود نیتروژن، تغییری در تاریخ پیش‌بینی‌شده برای گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک گیاه توسط مدل ایجاد نکرد و خروجی مدل تحت تمامی تیمارهای کودی (۰، ۹۲ و ۳۶۸ کیلوگرم در هکتار) در رابطه با صفات مذکور در هر سال از آزمایش عدد یکسانی بود (به‌ترتیب ۶۹ و ۶۶ برای گلدهی در سال اول و ۱۲۹ و ۱۲۳ برای رسیدگی در سال دوم)، در حالی‌که آزمایش مزرعه‌ای حاکی از تأثیر قابل‌توجه تنش نیتروژن بر وقوع تاخیر در مراحل فنولوژیک گیاه به‌ویژه زمان گلدهی بود (جدول ۵).

2- Overestimate
3- Underestimate

جدول ۳- مقدار ضرایب ژنتیکی به‌دست‌آمده از واسنجی برای رقم سینگل کراس ۷۰٤

Table 3- The genetic coefficients obtained from calibration for SC704 cultivar

ضریب **Coefficient**	مقدار **Value**	واحد **Unit**
بیشینه تعداد دانه در بلال Maximum number of grains per head	850	-
زمان دمایی تجمعی از زمان ظهور تا انتهای فاز جوانی Thermal time accumulation from seedling emergence to end of juvenile phase	270	درجه روز رشد °Cd
سرعت رشد دانه Grain growth rate	8	میلی گرم در روز mg $kernel^{-1}d^{-1}$
زمان دمای تجمعی از پایان فاز جوانی تا گل انگیزی Thermal time accumulation from end of juvenile phase to floral initiation	20	درجه روز رشد °Cd
فتوپریود بحرانی ۱ Critical photoperiod 1	12.5	ساعت h
فتوپریود بحرانی ۲ Critical photoperiod 2	20	ساعت h

جدول ٤- تاریخ کاشت، تعداد آبیاری و مقدار کود نیتروژن مرسوم در مناطق مورد مطالعه

Table 4- Common sowing date, number of irrigation, and the amount of nitrogen fertilizer in the studied locations

منطقه **Location**	تاریخ کاشت **Sowing date**	تعداد آبیاری **Number of irrigation**	کود نیتروژن **Nitrogen fertilizer (kg N ha^{-1})**
بردسیر Bardsir	یکم اردیبهشت 21-Apr	16	276
ارزوئیه Orzueeyeh	دهم تیر 01-Jul	16	260
جیرفت Jiroft	سی‌ام تیر 21-Jul	16	253

با این وجود، مدل APSIM توانست فنولوژی را بـا دقـت بسـیار بالایی (به‌ویژه تاریخ رسـیدگی) در مجمـوع مقـادیر کـودی (۰، ۹۲ و ۳۶۸ کیلوگرم در هکتار) شبیه‌سازی نماید. به‌طور متوسط مقـدار جـذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شـده (nRMSE) در پیش‌بینـی تـاریخ گلدهی کمتر از ۱۰ درصد و برای تاریخ رسیدگی کمتر از پـنج درصـد بود (جدول ۵). اختلاف نسبی موجـود بـین داده‌هـای مشاهده‌شـده و شبیه‌سازی‌شده در رابطه با فنولوژی گیاه ناشی از کم‌برآورد جزئی مدل به‌ویژه در مرحله‌ی اعتبارسنجی (۱۳۹۴) بود (مقادیر ضریب باقیمانـده در جـدول ۵). مقـدار شـاخص توافـق ویلمـوت (d-index) بـرای شبیه‌سازی فنولـوژی طـی مراحـل واسـنجی و اعتبارسـنجی بـه‌طور میانگین حدود ۰/۴ بـود کـه حـاکی از وجـود انطبـاق متوسـط میـان داده‌هـای شـبیه‌سازی‌شـده بـا داده‌هـای مشاهده‌شـده در رابطـه بـا تاریخ‌های گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک گیاه بود (جدول ۵).

مدل CERES-Maize توسط گانگولا و همکـاران (Gungula, Kling, & Togun, 2003) برای شبیه‌سازی تـأثیر مقـادیر مختلـف نیتروژن (۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار) بر فنولوژی هفـت هیبرید دیررس ذرت در نیجریه استفاده شـد. نتـایج حاصـل حـاکی از وجـود یـک رابطـه‌ی خطـی بـین مقـادیر نیتـروژن و تعـداد روز تـا ابریشم‌دهی و رسیدگی (R^2=۰/۷) در مورد اکثر هیبریـدها بـود. مـدل توانست به‌خوبی تاریخ ابریشم‌دهی گیاه در مقادیر بالای نیتـروژن (۹۰ و ۱۲۰ کیلـوگرم در هکتـار) را پـیش‌بینـی نمایـد (بـا کمتـر از دو روز اختلاف). به‌طور مشابهی، تاریخ رسیدگی گیـاه نیـز در مقـادیر بـالای نیتروژن در رابطه با اکثر هیبریدها با کمتـر از دو روز اخـتلاف توسـط مدل پیش‌بینی شد. با این وجود در مقادیر پایین نیتـروژن، اختلافـات بیشتری میـان داده‌هـای مشاهده‌شـده بـا داده‌هـای شـبیه‌سازی‌شـده مشاهده گردید. آن‌ها اظهار داشـتند کـه اسـتفاده از مـدل CERES-Maize بـرای پـیش‌بینـی فنولـوژی ذرت فقـط تحـت شـرایط عـدم محدودیت نیتروژن قابل‌اعتماد مـی‌باشـد و بـه‌منظور ارتقـای صـحت پیش‌بینی فنولوژی در خـاک‌هـای دارای محـدودیت نیتـروژن توسـط مدل، وارد کردن فـاکتور تـنش نیتـروژن در مـدل ضـروری بـه نظـر می‌رسـد. توانـایی مناسـب مـدل CERES-Maize در شـبیه‌سـازی فنولوژی چهار هیبرید ذرت دانه‌ای با گروه‌های رسـیدگی متفـاوت در یک منطقه نیمه‌گرمسیری در برزیل تحت سیستم‌های کشـت آبـی و دیـم توسـط سـولر و همکـاران (Soler, Sentelhas, & Hoogenboom, 2007) نیزگزارش شده است.

جدول ٥- شاخص‌های ارزیابی مدل APSIM در پیش‌بینی از کاشت تا گلدهی و رسیدگی ذرت تحت تیمارهای مختلف نیتروژن (۰، ۹۲ و ۳٦۸ کیلوگرم در هکتار) در مراحل واسنجی (۱۳۹۳) و اعتبارسنجی (۱۳۹٤)

Table 5- Evaluation indices of APSIM model in predicting days from planting to flowering and maturity of maize under different nitrogen treatments (0, 92, and 368 kg ha^{-1}) in calibration (2014) and validation (2015) stages.

تیمار Treatment	روز از کاشت تا گلدهی Days from planting to flowering				روز از کاشت تا رسیدگی Days from planting to maturity			
	واسنجی (۱۳۹۳) Calibration (2014)		اعتبارسنجی (۱۳۹٤) Validation (2015)		واسنجی (۱۳۹۳) Calibration (2014)		اعتبارسنجی (۱۳۹٤) Validation (2015)	
	مشاهده‌شده Observed	شبیه‌سازی‌شده Predicted	مشاهده‌شده Observed	شبیه‌سازی‌شده Predicted	مشاهده‌شده Observed	شبیه‌سازی‌شده Predicted	مشاهده‌شده Observed	شبیه‌سازی‌شده Predicted
0 kg N ha^{-1}	74	69	87	66	131	129	135	123
92 kg N ha^{-1}	68	69	80	66	128	129	134	123
368 kg N ha^{-1}	69	69	76	66	132	129	136	123
nRMSE (%)	2.41		11.17		0.95		5.14	
CRM (-)	0.018		0.185		0.01		0.08	
d-index (-)	0.42		0.33		0.47		0.09	

nRMSE: the normalized root mean square error; CRM: coefficient of residual mass; d-index: index of agreement.

شبیه‌سازی مقدار عملکرد بیولوژیک برای هیبرید سینگل‌کراس ۷۰۴ با دقت بالایی توسط مدل انجام شد. مقدار آماره‌ی nRMSE برای شبیه‌سازی عملکرد بیولوژیک هیبرید سینگل‌کراس ۷۰۴ در مرحله‌ی واسنجی برابر ۱۴/۸ درصد و در مرحله اعتبارسنجی برابر با ۱۳/۹ درصد بود (جدول ۶). مقادیر جزئی کم‌برآورد (CRM=۰/۱۹) در رابطه با پیش‌بینی عملکرد بیولوژیک در مرحله‌ی واسنجی و بیش‌برآورد (CRM=-۰/۱۸) در مرحله‌ی اعتبارسنجی توسط مدل مشاهده شد. همچنین مقادیر بالای شاخص توافق ویلموت (d) برابر با ۰/۹۵، حاکی از عملکرد بهتر مدل در شبیه‌سازی میزان عملکرد بیولوژیک در سال دوم آزمایش بود (جدول ۶). با توجه به نمودار یک به یک هم، مدل در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی از کارایی خوبی در پیش‌بینی عملکرد بیولوژیک ذرت برخوردار بود. ضریب تبیین برای مراحل واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب برابر با ۰/۹۸ و ۰/۸۹ بود (شکل ۱).

کپونگور (Kpongor, 2007) ضمن استفاده از مدل APSIM برای پیش‌بینی پاسخ عملکرد بیولوژیک سورگوم نسبت به کود نیتروژن و فسفر تحت دو سیستم متفاوت مدیریتی در غنا، قدرت پیش‌بینی عملکرد بیولوژیک توسط مدل را خوب ارزیابی کردند (R^2=۰/۸۶). به‌طور مشابهی دلوه و همکاران (Delve *et al.*, 2009) بیان داشتند که مدل APSIM در پیش‌بینی رشد و عملکرد گیاهان ذرت و لوبیا تحت تأثیر منابع مختلف تامین فسفر (کود شیمیایی و کود مرغی) و مقادیر مختلف آن از اعتبار کافی برخوردار است.

مدل APSIM توانست عملکرد دانه را تحت تأثیر مجموع تیمارهای نیتروژن در هر دو مرحله‌ی واسنجی و اعتبارسنجی با دقت بالایی پیش‌بینی کند (شکل ۲ و ۳). مقادیر nRMSE برای پیش‌بینی عملکرد دانه در مرحله‌ی واسنجی برابر با ۱۱/۲۳ درصد و در مرحله‌ی اعتبارسنجی برابر با ۱۳/۲۱ درصد بود (جدول ۶). در واسنجی مدل مقدار عملکرد دانه را کمتر تخمین زد (CRM=۰/۱۲) و در مرحله اعتبارسنجی مدل مقدار عملکرد دانه را بیشتر پیش‌بینی کرد (CRM=-۰/۱۵). شاخص توافق ویلموت بیانگر وجود اختلاف کمتر میان داده‌های مشاهده‌شده با داده‌های شبیه‌سازی‌شده در مرحله‌ی اعتبارسنجی (d=۰/۹۷) نسبت به مرحله‌ی واسنجی (d=۰/۸۳) مدل بود (جدول ۶).

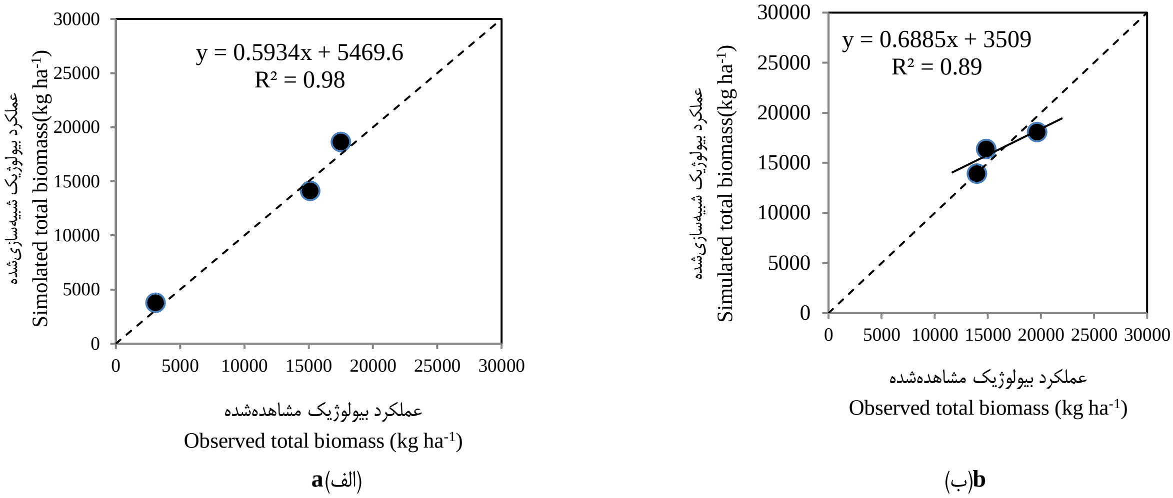
جدول ٦- پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل APSIM در پیش‌بینی عملکرد بیولوژیک وعملکرد دانه هیبرید ذرت سینگل‌کراس ۷۰٤ تحت تأثیر مقادیر مختلف نیتروژن (۰، ۹۲ و ۳٦۸ کیلوگرم در هکتار) طی مراحل واسنجی (۱۳۹۳) و اعتبارسنجی

Table 6- Performance evaluation parameters of APSIM model in simulating biological yield and grain yield of maize SC704 hybrid under the different amounts of nitrogen (0, 92, and 368 kg ha^{-1}) during the calibration and validation periods

	اعتبارسنجی Validation			واسنجی (۱۳۹۳)Calibration (2014)		
	d-index (-)	CRM (-)	nRMSE (%)	d-index (-)	CRM (-)	nRMSE (%)
عملکرد بیولوژیک Biological yield	0.95	-0.18	13.95	0.66	0.19	14.77
عملکرد دانه Grain yield	0.92	-0.11	9	0.83	0.12	11.23

nRMSE: جذر میانگین مربعات خطای نرمال، CRM: ضریب باقیمانده، d-index: شاخص توافق ویلموت

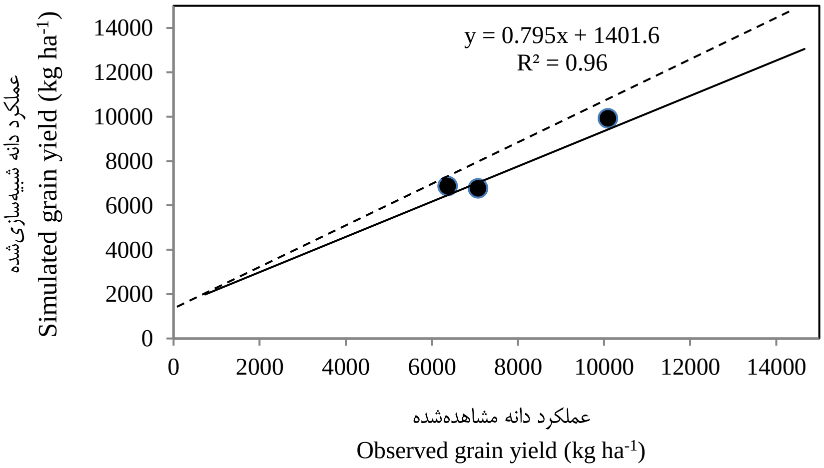
nRMSE: normalized root mean square error, CRM: residual coefficient, d-index: Wilmot agreement index



شکل ۱- مقایسه مجموع عملکرد بیولوژیک مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل APSIM برای هیبرید سینگل‌کراس ۷۰٤ تحت مقادیر مختلف نیتروژن (۰، ۹۲ و ۳٦۸ کیلوگرم در هکتار) در مرحله واسنجی (الف) و اعتبارسنجی (ب)

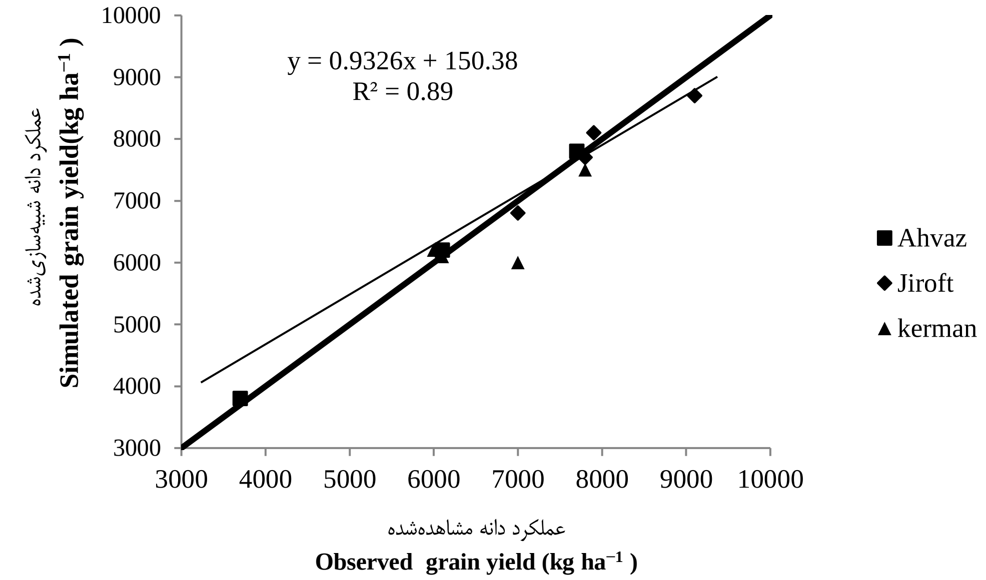
Figure 1- Comparison of observed and simulated biological yield using APSIM model for SC704 hybrid under different amounts of nitrogen (0, 92, and 368 kg ha^{-1}) during the (calibration) (A) and (validation (B) periods)

بر اساس نمودار یک به یک ترسیم‌شده بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده برای عملکرد دانه‌ی رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ تحت تأثیر تمامی مقادیر نیتروژن (۰، ۹۲ و ۳۶۸ کیلوگرم در هکتار) در مجموع دو سال واسنجی و اعتبارسنجی مدل، همانند عملکرد بیولوژیک، مدل توانست عملکرد دانه نهایی را به‌خوبی شبیه‌سازی کند و مقدار ضریب تبیین برابر با ۰/۹۶ و ۰/۸۹ بود (شکل ۲ و ۳). مقدار متوسط ضریب تبیین (R^2) برای عملکرد دانه ذرت در آزمایش دلوه و همکاران (Delve *et al.*, 2009) برابر با ۰/۷۷ بود و آن‌ها بیان داشتند که مدل APSIM در پیش‌بینی رشد و عملکرد ذرت تحت منابع مختلف تامین فسفر (کود شیمیایی و کود مرغی) و مقادیر مختلف آن از اعتبار کافی برخوردار است. کپانگور (Kpongor, 2007) قدرت مدل APSIM در پیش‌بینی عملکرد دانه سورگوم نسبت به کود نیتروژن و فسفر تحت دو سیستم متفاوت مدیریتی در غنا را خوب (R^2=۰/۸۱) ارزیابی کردند. میائو (Miao *et al.*, 2006) ضمن ارزیابی توانایی مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی عملکرد دانه برای دو هیبرید ذرت (33G26 و 33J24) تحت پنج مقدار نیتروژن (۰، ۱۱۲، ۱۶۸، ۲۲۴ و ۳۳۶ کیلوگرم در هکتار) دریافتند که به‌استثنای تیمار بدون کود، در سایر تیمارها مدل از قدرت پیش‌بینی بالایی برخوردار بوده؛ به گونه‌ای که توانست ۹۳ درصد از تغییرات موجود در داده‌های مربوط به عملکرد هیبریدها را توجیه نماید.



شکل ۲- مقایسه مجموع عملکرد دانه مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل APSIM برای هیبرید سینگل‌کراس ۷۰٤ تحت مقادیر مختلف نیتروژن (۰، ۹۲ و ۳٦۸ کیلوگرم در هکتار) در مرحله واسنجی

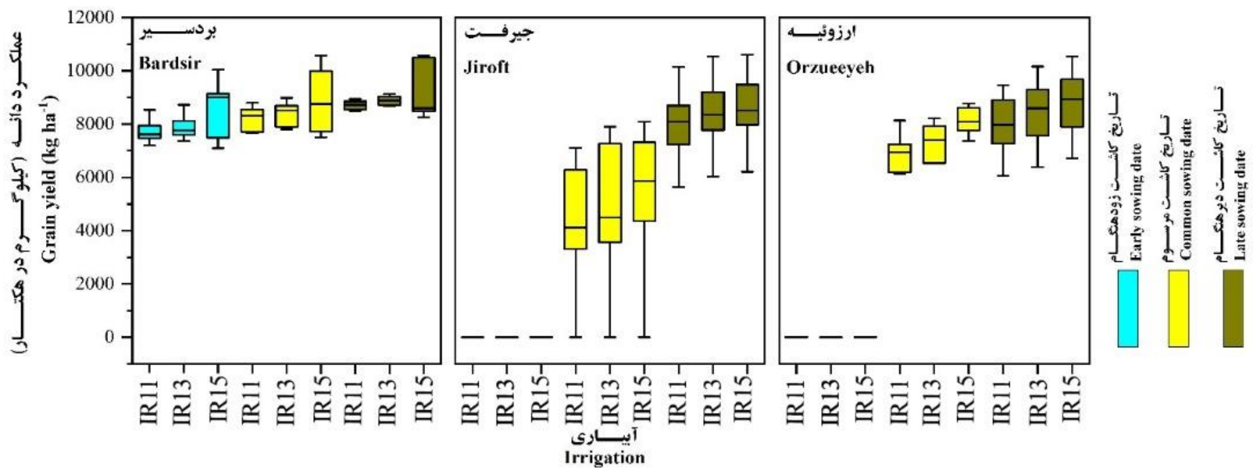
Figure 2- Comparison of observed and simulated grain yield using APSIM model for SC704 hybrid under different amounts of nitrogen (0, 92, and 368 kg ha^{-1}) during the (calibration period)



شکل ۳- مقایسه عملکرد دانه مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل APSIM در مرحله اعتبارسنجی
Figure 3- Comparison of observed and simulated grain yield of SC704 hybrid during the validation period

بهینه‌سازی تولید ذرت: آزمایش‌های شبیه‌سازی

میانگین عملکرد دانه ذرت با توجه به عملیات مدیریتی مرسوم کشاورزان در کل استان کرمان ۶۶۷۸ کیلوگرم در هکتار شبیه‌سازی شد (شکل ۴). که با توجه به منطقه عملکرد متفاوت بود؛ به طوری که در سراسر تیمارهای تاریخ کاشت و آبیاری، بیشینه عملکرد دانه ذرت مربوط به شهرستان بردسیر با ۸۳۱۷ کیلوگرم در هکتار و کمینه مقدار آن در شهرستان جیرفت با ۴۷۳۵ کیلوگرم در هکتار ثبت گردید (شکل ۴). نتایج نشان می‌دهد که مناطق مختلف از لحاظ تولید ذرت دارای پتانسیل‌های مختلفی می‌باشند. این موضوع را می‌توان در طول دوره رشد و میانگین دما در طول دوره رشد ذرت در مناطق مختلف دید به طوری که در منطقه بردسیر ذرت دارای طول دوره رشد بیشتر (۱۴۵/۶ روز) و میانگین دمای کمتری در طول دوره رشد (۲۱/۸ درجه سانتی‌گراد) است (جدول ۸). این باعث تشکیل بیشینه عملکرد در این منطقه نسبت به سایر مناطق شده است. به طور کلی با کاهش طول دوره رشد و به ویژه طول دوره رشد رویشی عملکرد ذرت کاهش می‌یابد.



شکل ٤- عملکرد دانه در تیمارهای آبیاری (۱۱، ۱۳ و ۱۵ نوبت آبیاری)، تاریخ کاشت (مرسوم، زودهنگام، دیرهنگام) و مناطق مورد مطالعه (بردسیر، جیرفت، ارزوئیه). طول باکس پلات‌ها نشان‌دهنده تغییرات عملکرد شبیه‌سازی‌شده در سال‌های (۱۳۹۷-۱۳۷۹) مختلف است.
Figure 4- Grain yield under irrigation treatments (IR18: 18 times irrigation; IR16: 16 times irrigation; IR14: 14 times irrigation), sowing dates (common, early, and late), and studied locations (Bardsir, Jiroft, and Orzueeyeh). The length of the box plots shows the changes in the simulated grain yield in different years (2000-2018).

جدول ۷- میانگین دما در طول فصل رشد، طول دوره رشد و میانگین بیشینه دما در طول دوره گلدهی گیاه ذرت در مناطق مورد مطالعه و تاریخ کاشت‌های مختلف از ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۷

Table 7- Mean temperature during the growing season, length of growth period, and mean maximum temperature during flowering period under different sowing dates (common, early, and late) and studied locations (Bardsir, Jiroft, and Orzueeyeh) from 2000-2018

منطقه Location	تاریخ کاشت Sowing date	میانگین دما در طول فصل رشد Mean temperature during the growing season (°C)	طول دوره رشد (روز) Length of growth period (Day)	میانگین بیشینه دما در طول دوره گلدهی Mean maximum temperature during flowering period (°C)
بردسیر Bardsir	مرسوم Common	22.3	142	34.5
	زودهنگام Early	22.5	154	33.9
	دیرهنگام Late	20.7	141	33.9
ارزوئیه Orzueeyeh	مرسوم Common	28.7	133	38.9
	زودهنگام Early	32.6	129	42.3
	دیرهنگام Late	22.5	154	34.4
جیرفت Jiroft	مرسوم Common	28.2	130	38.7
	زودهنگام Early	31.8	124	41.3
	دیرهنگام Late	21.4	154	33.9

در بین تاریخ کاشت‌های مختلف تاریخ کاشت‌های دیرهنگام در سراسر مناطق و تیمارهای آبیاری کارکرد بهتری از خود نشان دادند به طوری که تاریخ کاشت‌های دیرهنگام عملکرد دانه معادل با ۸۵۲۹ کیلوگرم در هکتار تولید کردند و نسبت به تاریخ کاشت‌های مرسوم و زودهنگام عملکرد دانه را به‌ترتیب به میزان ۲۶ و ۲۰۰ درصد افزایش دادند (شکل ۴). تأثیر تاریخ کاشت بر افزایش عملکرد دانه گیاه ذرت را می‌توان در صفت میانگین بیشینه دما در طول دوره گلدهی گیاه ذرت دید (جدول ۷). در واقع تاریخ کاشت‌های دیرهنگام باعث تشکیل گلدهی در بیشنه دماهای کمتر می‌شود به طوری که این تاریخ کاشت‌ها نسبت به تاریخ کاشت‌های مرسوم و زودهنگام میانگین بیشینه دما در طول دوره گلدهی گیاه ذرت را به‌ترتیب هشت و ۱۳ درصد کاهش می‌دهد. بسیاری از مطالعات نشان می‌دهد که ذرت نسبت به دمای خیلی بالا حساس بوده و افزایش دما تا حدود زیادی می‌تواند عملکرد این گیاه را کاهش دهد (Dupuis & Dumas, 1990; Hatfield & Prueger, 2015). این کاهش عملکرد می‌تواند به‌واسطه افزایش تنفس، کاهش فتوسنتز، کوتاه کردن چرخه محصول و مهم‌تر از آن کاهش باروری و عقیم شدن دانه گرده (Dupuis & Dumas, 1990; Hatfield & Prueger, 2015) ایجاد شود. در گیاه ذرت بیشینه دماهای بالاتر از ۳۶ درجه سانتی‌گراد باعث عقیم شدن دانه گرده گیاه ذرت می‌شود به طوری که دانه تشکیل نمی‌شود. این موضوع را می توان در شکل ۴ و در تاریخ کاشت‌های زودهنگام در دو منطقه جیرفت و ارزوئیه به‌خوبی مشاهده کرد به طوری که بیشنه دماهای بالا در تاریخ کاشت‌های زودهنگام در دو منطقه جیرفت (۴۱/۳ درجه سانتی‌گراد) و ارزوئیه (۴۲/۳ درجه سانتی‌گراد) باعث عدم تشکیل دانه گیاه ذرت شد (شکل ۴ و جدول ۷). به طورکلی افزایش دما از طریق تأثیر بر روی کاهش باروری دانه گرده ذرت باعث کاهش تعداد دانه می‌شود. مرا و همکاران (Mera, Niyogi, Buol, Wilkerson, & Semazzi, 2006) در تحقیق خود بیان کردند که افزایش دما بیشترین تأثیر را بر مرحله گل‌دهی ذرت گذاشته و با کاهش درصد و دوره تلقیح گل، درنهایت باعث کاهش تعداد دانه و عملکردانه ذرت می‌شود. همچنین کاهش وزن دانه ذرت به علت کاهش طول دوره رشدی (همبستگی بین وزن دانه با طول دوره رشدی، رشد رویشی و رشد زایشی معنی‌دار و مثبت می‌باشد) آن به‌واسطه افزایش دما در دوره آینده می‌باشد. با این حال این اثرات منفی افزایش دما بر روی تعداد و وزن دانه را با تغییر تاریخ کاشت می‌توان کاهش داد.

در زمینه تیمارهای مختلف آبیاری در سراسر مناطق و تیمارهای تاریخ کاشت، بیشترین عملکرد دانه به‌ترتیب با ۶۳۱۷، ۵۹۱۹ و ۵۶۷۱

کیلوگرم در هکتار در تیمارهای ۱۵، ۱۳ و ۱۱ نوبت آبیاری به‌دست آمد (شکل ۴). در بین برهمکنش‌های مختلف ممکن، در سراسر استان کرمان تاریخ کاشت دیرهنگام همراه با آبیاری ۱۵ دور با ۸۸۷۲/۸ کیلوگرم در هکتار بهترین کارکرد را داشت. همچنین با در نظر گرفتن منطقه، بهترین کارایی در اثرمتقابل شهرستان بردسیر و تاریخ کاشت دیرهنگام با ۱۵ دور آبیاری به مقدار ۹۳۰۰ کیلوگرم در هکتار ثبت شد (شکل ۴).

عملکرد دانه می‌تواند بسته به میانگین دما در طول فصل رشد ذرت متفاوت باشد. به طوری که تحت شرایط افزایش درجه حرارت و محدود شدن طول فصل رشد می‌تواند در مناطق گرم اثرات منفی و در مناطق خنک افزایش درجه حرارت باعث بهبود شرایط دمایی برای رشد گیاه زراعی شود (Monzon, Sadras, Abbate, & Caviglia, 2007). همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود میانگین دما در طول فصل رشد ذرت در شهرستان بردسیر و تاریخ کاشت دیرهنگام کمتر از سایر مناطق و تاریخ کاشت‌ها می‌باشد. این موضوع باعث افزایش عملکرد ذرت می‌شود. محدودیت فصل رشد باعث کوتاه شدن دوره پر شدن دانه و کاهش عملکرد می‌شود (Boote, 2011). این در حالی است که کمتر شدن دما باعث افزایش طول دوره رشد شده و شرایط را برای رشد گیاه ذرت فراهم می‌کند. به‌طور میانگین در سراسر کرمان، تیمار آبیاری ۱۵ دور و تاریخ کاشت دیرهنگام بهترین کارکرد را از نظر عملکرد دانه (۸۸۷۲/۸ کیلوگرم در هکتار) داشت. اثر تنش رطوبتی بر کاهش عملکرد گیاهان زراعی در بسیاری از منابع علمی گزارش شده است (Izadi-Darbandi, 2012) و در واقع با افزایش دور آبیاری (۱۵ مرتبه در هر فصل کشت) تنش رطوبتی کمتری به گیاه زراعی وارد می‌شود این موضوع باعث افزایش عملکرد دانه ۱۵ دور نسبت به آبیاری ۱۱ و ۱۳ دور شده است. این سطح آبیاری همراه با تاریخ کاشت دیرهنگام می‌تواند شرایط بهینه‌ای را برای عملکرد بیشتر به‌وجود آورد. در واقع در شرایط رطوبتی و هوایی بهینه، کشت یک رقم دیررس با طول دوره رسیدگی بالا (رقم مورد استفاده در این تحقیق سینگل کراس ۷۰۴ به‌عنوان یک رقم دیررس شناخته می‌شود) می‌تواند عملکرد دانه را افزایش دهد. نتایج تحقیقات مختلف نیز موید این موضوع می‌باشد (Rahimi-Moghaddam, Kambouzia, & Deihimfard, 2018).

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط مدل APSIM نشان داد که مدل رشد و عملکرد رقم سینگل کراس ۷۰۴ به‌عنوان رقم غالب در بوم‌نظام‌های ذرت دانه‌ای استان کرمان را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند. با این وجود ضعف اصلی مدل در عدم حساسیت آن نسبت به تأثیر تنش نیتروژن بر فنولوژی گیاه بود. با این وجود مدل توانست با دقت قابل‌قبولی عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه نهایی ذرت تحت تیمارهای مختلف نیتروژن در دو سال شبیه‌سازی کند. از این رو این مدل می‌تواند به‌عنوان ابزاری قابل‌اعتماد برای پیش‌بینی عملکرد محصول قبل از انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای و کاهش هزینه‌های تحقیقاتی به‌کار گرفته شود.

در زمینه کاربرد مدل APSIM برای بهینه‌سازی تولید ذرت در بوم‌نظام‌های مختلف ذرت دانه‌ای در سطح استان کرمان نتایج مشخص نمود که تاریخ کاشت‌های مرسوم که در حال حاضر توسط کشاورزان به‌کار برده می‌شود در دوره‌ی بهینه‌ی زمانی واقع نشده‌اند. بیشتر کشاورزان تا حال حاضر به‌طور دقیق نمی‌دانند که در بسیاری از فصل‌ها ذرت را در دامنه‌ای از ریسک بالای دماهای حدی کشت می‌کنند. اگر کشاورزان به جای تاریخ کاشت مرسوم از تاریخ کاشت دیرهنگام (۲۰ روز پس از تاریخ کاشت مرسوم) در کنار تیمار ۱۵ نوبت آبیاری در طول فصل رشد ذرت استفاده کنند، عملکرد ذرت دانه‌ای بهبود می‌یابد. پیشنهاد می‌شود به‌منظور بهینه‌سازی تولید ذرت در سطح استان، از تکنیک شبیه‌سازی به‌عنوان یک راهکار ژنتیکی- مدیریتی در بررسی واکنش ارقام مختلف ذرت نسبت به تغییر پارامترهای مختلف مدیریتی (تراکم کاشت، تاریخ کاشت، آبیاری، کود نیتروژن و غیره) استفاده شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از اساتید و کارکنان گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان و همچنین از اداره کل سازمان هواشناسی، مرکز تحقیقات کشاورزی و سازمان جهاد کشاورزی استان کرمان که ما را در انجام این پژوهش یاری کرده‌اند صمیمانه تشکر می‌نماییم.

References

1. Amjed, A., Sanjani, S., Hoogenboom, G., Ahmad, A., Khaliq, T., Wajid, S. A., Noorka, I. R., & Ahmad, S. (2012). Application of crop growth models in agriculture of developing countries*: a review. Horticultural Science and Technology*, *1*(4), 95-99. https://doi.org/10.1016/S1125-0301(02)00100-5
2. Anonymous, (2022). Agricultural Statistics. Iranian Ministry of Agricultural Jihad. Department of Planning and Economic Affairs. Center of Statistics and Information Technology. Iran. p. 95. (in Persian).
3. Boote, K. J. (2011). *Crop adaptation to climate change. Improving soybean cultivars for adaptation to climate change and climate variability*. S.S. Yadav, R.J. Redden, J.L. Hatfield, H. Lotze-Campen, and A.E. Hall

international editions. Wiley-Blackwell pp, 370-395. https://doi.org/10.1002/9780470960929.ch26

4. Choukan, R. (2013). Final Report of Yield Trial and Adaptability of Late and Medium Maturing promising Hybrids of Maize (Final Stage). In: Seed and Plant Improvement Institute (Ed.), Agricultural Research, Education and Extension Organization, Iran, pp. 50. (in Persian with English abstract).
5. Delve, R. J., Probert, M. E., Cobo, J., Ricaurte, J., Rivera, M., Barrios, E., & Rao, I. M. (2009). Simulating phosphorus responses in annual crops using APSIM: model evaluation on contrasting soil types. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *84*, 293-306. https://hdl.handle.net/10568/17023
6. Dupuis, I., & Dumas, C. (1990). Influence of temperature stress on in vitro fertilization and heat shock protein synthesis in maize (*Zea mays* L.) reproductive tissues. *Plant Physiol*ogy, *94*, 665-670. https://doi.org/10.1016/S1125-0301(02)00100-5
7. FAO. (2017). Agricultural production statistics. Available: http://faostat.fao.org
8. Fosu-Mensah, B. Y., MacCarthy, D. S., Vlek, P. L. G., & Safo, E. Y. (2012). Simulating impact of seasonal climatic variation on the response of maize *(Zea mays* L.) to inorganic fertilizer in sub-humid Ghana. Nutrient Cycling in Agroecosystems, *94*, 255-271. https://doi.org/1010.07/s10705-012-9539-4.2134
9. Gungula, D., Kling, J., & Togun, A. (2003). CERES-Maize predictions of maize phenology under nitrogen-stressed conditions in Nigeria. *Agronomy Journal*, *95*, 892-899. https://doi.org/10.2134/agronj2003.8920
10. Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: *effect on plant growth and development. Weather and Climate Extremes*, *10*, 4-10. https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001
11. Izadi-Darbandi, E. (2012). Evolution of drought stress and nitrogen rate on redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*) and corn (*Zea mays*) competition. *Pajouhesh & Sazandegi*. *94*, 68-74. (in Persian).
12. Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., & McLean, G. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, *18*(3-4), 267-288. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9
13. Kpongor, D. S. (2007). Spatially explicit modeling of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) production on complex terrain of a semi-arid region in Ghana using APSIM. Universitäts-und Landesbibliothek, Bonn, Germany, pp, 144. https://hdl.handle.net/10568/17027
14. MacCarthy, D. S., Sommer, R., Vlek, P. L. (2009). Modeling the impacts of contrasting nutrient and residue management practices on grain yield of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) in a semi-arid region of Ghana using APSIM. *Field Crops Research*, *113*, 105-115. https://hdl.handle.net/10568/17023
15. Madadizadeh, M. (2017). Simulation of growth and development of current maize (*Zea mays* L.) hybrids under different nitrogen levels in Kerman province, Iran. Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, pp, 165. (in Persian).
16. Marwein, M. A., Choudhury, B. U., Chakraborty, D., Kumar, M., Das, A., Rajkhowa, D. J. (2017). Response of water deficit regime and soil amelioration on evapotranspiration loss and water use efficiency of maize (*Zea mays* L.) in subtropical northeastern Himalayas. *International Journal of Biometeorology*, *61*, 845-855. https://doi.org/10.1007/s00484-016-1262-4
17. McCown, R., Hammer, G., Hargreaves, J., Holzworth, D., & Freebairn, D. (1996). APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, *50*, 255-271. https://doi.org/10.1016/S1125-0301(02)00100-5
18. Mera, R. J., Niyogi, D., Buol, G. S., Wilkerson, G. G., & Semazzi, F. H. M. (2006). Potential individual versus simultaneous climate change effects on soybean (C3) and maize (C4) crops: An agrotechnology model based study. *Global and Planetary Change*, *54*, 163-182. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2005.11.003
19. Miao, Y., Mulla, D. J., Batchelor, W. D., Paz, J. O., Robert, P. C., & Wiebers, M. (2006). Evaluating management zone optimal nitrogen rates with a crop growth model. *Agronomy Journal*, *98*, 545-553. https://doi.org/10.2134/agronj2005.0153
20. Moini, S., Javad, S., & Dehghan Manshadi, M. (2011). Feasibility study of solar energy in Iran and preparing radiation atlas. Recent Advances in Environment, Energy Systems and Naval Science: Proceedings of the 4th International Conference on Environmental and Geological Science and Engineering. Pp, 1-7.
21. Monteith, J. L. (1986). How do crops manipulate water supply and demand? *Philos. Philosophical Transactions of the Royal Society*, *316*, 245-259. https:// 10.1098/rsta.1986.0007.2006.09.007
22. Monzon, J., Sadras, V., Abbate, P., & Caviglia, O. (2007). Modeling management strategies for wheat–soybean double crops in the south-eastern Pampas. *Field Crops Reseearch*, *101*, 44-52. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.09.007
23. Prescott, J. A. (1940). Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, *64*(1), 114-118. https://doi.org/10.1016/S1125-0301(02)00100-5
24. Rafiee Manesh, S., Aynehband, A., & Nabati Ahmadi, D. (2010). Investigating the effect of irrigation water amount and irrigation depletion time in different stages of growth on yield and yield components of the SC704 maize hybrid under Ahwaz climatic conditions. *Crop Physiology Journal*, *7*, 93-105. (in Persian).
25. Rahimi-Moghaddam, S., Kambouzia, J., & Deihimfard, R. (2018). Adaptation strategies to lessen negative impact of climate change on grain maize under hot climatic conditions: A model-based assessment. *Agricultural and*

Forest Meteorology, *253*, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.032
26. Saxton, K. E., & Willey, P. H. (2006). The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. Watershed models. V.P. Singh, D.K. Frevert international editions. Boca Raton Pp, 401-435. https://doi.org/11.1016/0376-4290(86)90054-1
27. Sinclair, T. R. (1986). Water and nitrogen limitations in soybean grain production I. Model development. *Field Crops Research*, *15*(2), 125-141. https://doi.org/10.1016/0378-4290(86)90082-1
28. Soler, C. M. T., Sentelhas, P. C., & Hoogenboom, G. (2007). Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *European Journal of Agronomy*, *27*, 165-177. https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.03.002
29. Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2012). Modeling physiology of crop development, growth and yield. CAB, Cambridge, United Kingdom. 337p.
30. Teixeira, E. I., Zhao, G., de Ruiter, J., Brown, H., Ausseil, A. G., Meenken, E., & Ewert, F.(2017). The interactions between genotype, management and environment in regional crop modelling. *European Journal of Agronomy*, *88*, 106-115. https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.05.005
31. Wang, E., Robertson, M. J., Hammer, G. L., Carberry, P. S., Holzworth, D., Meinke, H., Chapmesan, S. C., Hargreaves, J. N. G., Huth, N. I., & Mclean, G. (2002). Development of generic crop model template in the cropping system model APSIM. *European Journal of Agronomy*, *18*, 121-140. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00100-4
32. Zizhong, L., & Zenghui, S. (2016). Optimized single irrigation can achieve high corn yield and water use efficiency in the Corn Belt of Northeast China. *European Journal of Agronomy*, *75*, 12-24. https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.12.015